

COMPARATIVO DO QUANTITATIVO DE AÇO E CONCRETO UTILIZADO EM UMA RESIDÊNCIA DE ALTO PADRÃO EM CONCRETO CONVENCIONAL E CONCRETO PROTENDIDO

CARVALHO, Luan Vinicius Sadovnik Neneve¹

PAGANIN, Ricardo²

ROCHEDO, Cristiano Sesti³

RESUMO

O método de protensão vem sendo cada vez mais utilizado na execução de edifícios no Brasil, devido a uma série de benefícios que pode trazer. Nesse contexto, o presente artigo procura trazê-lo ao meio acadêmico, de forma a apontar as principais diferenças entre este método, o de protensão e o método mais conhecido no Brasil, o concreto armado convencional. Para tanto, buscou-se relacionar o quantitativo de aço e concreto para ambos os métodos citados anteriormente, elaborando um projeto estrutural de uma residência de alto padrão em ambos os modelos estruturais. A execução dos projetos baseia-se na norma vigente de dimensionamento de estruturas em concreto NBR 6118:2014, juntamente com o auxílio de *softwares* já conhecidos no ramo da construção civil. Como resultado, obteve-se 49% de concreto e 134% de aço a mais no projeto, considerando os elementos protendidos. Isso pode ser justificado pelo peso e pela espessura das peças estruturais, que possuem espessura maior e peso das cordoalhas utilizadas superior às bitolas convencionalmente utilizadas no concreto armado convencional. Entretanto, apesar de um maior consumo de materiais, fica evidente a maior resistência das peças protendidas, podendo ser utilizados maiores vãos nas estruturas, além de apresentarem uma redução de flechas e fissuras nas lajes, entre outros. Salienta-se, então, a importância do estudo dos diferentes métodos construtivos, como o processo de protensão e destaca-se a importância da análise específica para cada tipologia de edificação a ser projetada.

PALAVRAS-CHAVE: Edificações, estrutura, métodos, protensão.

1. INTRODUÇÃO

Hoje, no Brasil, há uma variedade de métodos construtivos que possuem diferenças e recomendações para aplicação. Dentre os métodos estruturais, pode-se citar as estruturas de concreto armado convencional, estrutura em aço, madeira e concreto protendido.

O concreto convencional sem armaduras tem um bom desempenho em relação à resistência à compressão, porém apresenta queda considerável em relação ao efeito de tração. Para suprimir essa característica do concreto, pensou-se em acrescentar barras de aço às estruturas, que possuem um bom desempenho ao efeito de tração. Desde então, o concreto armado é o material mais

¹ Acadêmico do 10º período de Engenharia Civil do Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz. E-mail: vini_neneve@hotmail.com.

² Engenheiro Civil e Mestre em Energia na Agricultura do curso superior em Engenharia Civil do Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz.

³ Engenheiro Civil Especialista em estruturas do curso superior em Engenharia Civil do Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz.

utilizado em construções de pequeno, médio e grande porte, abrangendo desde pequenas residências, até grandes prédios e pontes (MARCHETTI e BOTELHO, 2002).

Outro método de utilização do concreto armado surgiu na implementação do concreto protendido. Caprani (2007) traz que a protensão surgiu no século 19, contudo com uso limitado, devido à má qualidade dos materiais presentes na época. Isso mudou nas décadas de 20 e 30, quando os materiais fabricados evoluíram, tornando o método de protensão mais confiável. Freyssinet na França, Magnel na Bélgica e Hoyer na Alemanha eram os principais desenvolvedores e utilizavam a protensão para fabricação de peças, como rodas de vagões e rebites.

Por possuir um comportamento estrutural diferente, Leonhardt (1983) demonstra que o concreto protendido implementa uma série de vantagens em relação ao concreto convencional, por exemplo, a possibilidade de vãos maiores e estruturas mais esbeltas, assim como o impedimento do desenvolvimento de fissuras nos elementos, deformações menores, e outras vantagens. O ramo da protensão está sendo cada vez mais utilizado, devido a sua evolução nos últimos anos, o que, em certos casos, pode tornar-se viável, tendo em vista a quantidade de benefícios que oferece.

A metodologia utilizada para a construção de elementos protendidos é diferente da de elementos com armadura convencional, isso ocorre por diversos fatores, como a utilização de matérias primas diferentes, que possuem comportamento estrutural semelhantes, porém são distintos. Silva (2015) também cita que, através da protensão, é possível atingir seções mais esbeltas em comparação ao concreto convencional, isso se dá porque toda a seção do concreto estará trabalhando com esforços de compressão, o que é um ponto positivo, pois o concreto possui elevada resistência a esse tipo de solicitação, fato que extinguirá a presença de fissuras na estrutura. Com isso, as peças podem apresentar menor peso próprio, e no caso de lajes, permitir uma altura menor do que com concreto armado.

Em contrapartida, Carvalho (2016) indica que a protensão exige um controle mais rigoroso durante a execução e provável encarecimento da estrutura, além da necessidade de mão de obra especializada. Salienta-se que os dimensionamentos realizados em concreto convencional e protendido geram resultados diferentes, como seções transversais, vãos, taxa de armadura, forma de execução, entre outros, sendo importante a verificação dessas e das diferenças projetuais em ambas as simulações dos métodos aplicados.

Tendo em vista o exposto, verifica-se que há diferenças entre os métodos de dimensionamentos de elementos estruturais, considerando uma estrutura de concreto armado

convencional e de uma estrutura de concreto armado protendido. Dessa forma, é relevante a identificação das diferenças entre o dimensionamento elaborado pelos dois métodos citados.

Esta pesquisa teve como problemática a identificação da quantidade de aço e concreto necessária para construir uma edificação em concreto convencional e concreto protendido. Para a realização da mesma, limitou-se à comparação da quantidade de aço e concreto utilizado para a construção de uma edificação residencial de alto padrão, localizada na cidade de Cascavel – PR, com um projeto arquitetônico pré-definido. Em relação ao método de protensão, considerou-se o método de pós-tração não aderente, em razão da facilidade de execução e por ser o mais recomendado para o objetivo proposto.

Sendo assim, essa pesquisa teve como objetivo geral comparar o quantitativo de aço e concreto que é utilizado na construção de uma edificação de alto padrão, utilizando dois métodos construtivos diferentes: o concreto armado convencional e o concreto protendido. Sendo que os objetivos específicos compreenderam a abordagem dos aspectos construtivos de ambos os métodos, a apresentação das possibilidades de elementos protendidos, a determinação dos quantitativos de aço e concreto para a supra-estrutura em dois modelos estruturais e a identificação das vantagens e desvantagens dos sistemas abordados.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. CONCRETO ARMADO

Segundo Marchetti e Botelho (2002), quando o homem passou a usar o concreto (que é uma pedra artificial criada através da ligação de cimento, areia e água), as vigas de eixo reto eram limitadas no seu vão pelo esforço de tração máximo que podiam suportar. Tração essa que surgia na parte inferior da viga. Logo, surgiu a ideia de reunir um material bom em esforços de tração (aço) com um bom em esforços de compressão (concreto), criando o concreto armado, conhecido nos dias atuais.

De forma interessante, Bastos (2014) relata que o concreto armado alia as qualidades do concreto (baixo custo, durabilidade, boa resistência à compressão, ao fogo e à água) com as do aço (ductilidade e excelente resistência à tração), o que permite construir elementos com as mais variadas formas e volumes, com relativa rapidez e facilidade, para os mais variados tipos de obras.

De acordo com a NBR 6118 (2014), um elemento de concreto armado é aquele cujo comportamento estrutural depende da aderência entre concreto e armadura, e nos quais não se aplicam alongamentos iniciais das armaduras antes da materialização dessa aderência.

O concreto armado vem sendo utilizado para uma variedade de aplicações, como pontes, estradas e pavimentos, barragens, muros de contenção, túneis, arcos, reservatórios, tubos, chaminés, torres de refrigeração entre outros, e apresenta uma série de benefícios no ramo da construção civil, por exemplo: adapta-se muito bem a qualquer tipo de molde, precisa de pouca manutenção em relação às estruturas metálicas e de madeira, possui resistência ao fogo e à água, tem boa rigidez, é extremamente resistente a esforços de compressão, é econômico, principalmente quando usado em fundações, muros e lajes entre outros (SUBRAMANIAN, 2013).

No que concerne às desvantagens, Camacho (2008) defende as características: peso próprio elevado, na ordem de 25Kn/m^3 , transmissão de sons e calor (o que exige cuidados especiais), facilidade de fissuração aparente (sem prejuízo estrutural, porém podendo comprometer a estética ou conduzir a um estado limite de utilização) e dificuldades de reformas e/ou demolição.

2.2 CONCRETO PROTENDIDO

O concreto protendido surgiu como uma evolução do concreto armado convencional, com a ideia básica de aplicar tensões prévias de compressão na região da seção transversal da peça, que será tracionada posteriormente pela ação do carregamento externo aplicado à peça. As tensões de tração finais são diminuídas pelas tensões de compressão pré-aplicadas à peça (protensão). Assim, pretende-se diminuir os efeitos da baixa resistência do concreto à tração (BASTOS, 2014).

O concreto protendido é o concreto armado ao qual se acrescenta mais um carregamento através de cabos de protensão. São peças de concreto, tais como vigas e lajes, nas quais tensões internas são induzidas por meio de aço de protensão (CAUDURO, 2003).

Elementos protendidos são aqueles nos quais parte das armaduras é previamente alongada por equipamentos de protensão, com a finalidade de, em condições de serviço, impedir ou limitar a fissuração e os deslocamentos da estrutura, bem como propiciar o melhor aproveitamento de aços de alta resistência no estado-limite último (NBR 6118, 2014).

Raju (2007) observa que o concreto protendido apresenta melhora na resistência a forças cortantes, devido aos esforços de compressão da protensão, os quais reduzem as principais tensões

de tração no elemento. Os usos de cabos curvados, particularmente nos casos de pós-tensão, ajudam a reduzir as forças cortantes desenvolvidas nas seções da peça.

Para Hurst (1998), a técnica de protensão tem diferentes aplicações na engenharia civil, muitas vezes sendo usada para manter cabos tensionados quando submetidos a forças de compressão. Contudo, de longe, a mais comum aplicação do concreto protendido é quando uma força de protensão é aplicada a um elemento de concreto, e este induz uma compressão axial que anula toda ou parte das tensões de tração geradas no cabo pelos carregamentos externos.

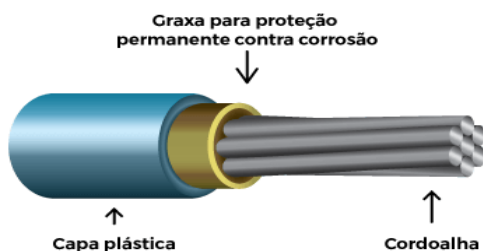
No que diz respeito às vantagens, Chust (2017) comenta: estruturas protendidas são mais leves em relação ao concreto armado convencional, além de possuírem grande durabilidade e pequenos custos de manutenção (o controle de fissuração do concreto aumenta a resistência ao ataque de agentes agressivos na armadura), boa resistência ao fogo, menores deformações em relação ao concreto armado, diminuição da presença de fissuras entre outros.

Ademais, Silva (2015) demonstra as desvantagens do concreto protendido da seguinte forma: estruturas protendidas possuem maior tendência à corrosão devido aos aços de protensão, possuem perdas de protensão, exigem equipamentos especializados (o que pode se tornar um empecilho dependendo do local da obra), necessitam de mão de obra especializada em estruturas protendidas (possuem execução diferente às convencionais), além de exigirem controle de execução mais rigoroso.

2.2.1 Protensão com o método de pós-tração sem aderência

Neste sistema de protensão são usados cabos de aço de alta resistência engraxados e revestidos por uma camada plástica, conforme observa-se na Figura 1, que são tracionados através de equipamento hidráulico e fixados no próprio concreto (DURANTI, 2014).

Figura 1 – Detalhe de cordoalha engraxada



Fonte: IMPACTO PROTENSÃO (2018).

De acordo com Cauduro (2003), a protensão pós-tração sem aderência segue, basicamente, 3 (três) processos executivos, que são:

- As fôrmas são erguidas e os cabos de pós-tração ainda não tensionados são colocados nelas, em seus devidos lugares, conforme especificado em projeto.
- O concreto é colocado na fôrma envolvendo os cabos até atingir o grau de endurecimento necessário.
- O aço de protensão (separado do concreto pela bainha de polietileno) é tensionado através de um macaco hidráulico, que se apoia diretamente na placa de ancoragem embutida no concreto endurecido. Por fim, a força no aço é transferida para o concreto por meio dos dispositivos de ancoragem nas extremidades do elemento estrutural.

Loureiro (2006), aponta que este método de execução possui uma série de vantagens, as quais podem se destacar:

- Possui melhor desempenho em serviço e maior resistência no ELU (estado limite último);
- Possibilita maior excentricidade no cabo, devido seu diâmetro pequeno, o que resulta numa maior eficiência de protensão, uma vez que a carga balanceada é diretamente proporcional à flecha do cabo;
- As lajes protendidas sem vigas permitem o uso de pés-direitos menores, resultando numa menor altura total do edifício, ou num maior número de pavimentos;
- No caso de edificações o uso de lajes protendidas permite grande flexibilização na utilização dos espaços e o menor número de pilares pode aumentar as vagas de garagem;
- A simplicidade de execução de fôrma plana, a facilidade de fixação das ancoragens individuais e de baixo peso, bem como a agilidade no manuseio das mono-cordoalhas engraxadas e plastificadas, que dispensam o uso de bainhas e evitam a operação de injeção, resultam numa maior

rapidez de execução da estrutura. Além disso, a operação de protensão é simples e rápida, pois utiliza equipamentos leves, que podem até ser carregados manualmente.

f) Para vãos maiores que 6,5 metros, a laje lisa protendida com cordoalhas engraxadas já é uma alternativa estrutural competitiva com a solução convencional das lajes de concreto armado apoiado em vigas, principalmente se forem levadas em conta as vantagens citadas anteriormente.

Contudo, Veríssimo e Cesar Jr (1998) citam algumas desvantagens do concreto protendido, as quais são:

- a) O concreto protendido exige melhor qualidade de execução;
- b) Os aços de alta resistência exigem cuidados especiais desde o seu recebimento até a montagem das cordoalhas na laje;
- c) A colocação dos cabos de protensão deve ser feita com a máxima precisão de modo a garantir as posições admitidas nos cálculos. Como a força de protensão possui um valor muito alto, um pequeno desvio do cabo em relação ao projeto pode produzir esforços não previstos, levando o comportamento inadequado da laje e até mesmo ao colapso.
- d) As operações de protensão exigem equipamento e pessoal especializados, com controle permanente dos esforços aplicados e dos alongamentos das cordoalhas.
- e) De uma maneira geral, os edifícios com lajes protendidas exigem manutenção e controle superiores aos necessários para o concreto convencional.

Monteiro (2008) cita que a protensão não-aderente se caracteriza pela liberdade de deslocamento relativo entre o cabo de protensão e a fibra de concreto adjacente e salienta ainda que a tensão na armadura de protensão no estado limite último é de difícil obtenção, não sendo dependente apenas das deformações em uma determinada seção transversal, mas função de todas as deformações que ocorrem no concreto adjacente ao perfil de protensão.

3. METODOLOGIA

3.1 TIPO DE ESTUDO E LOCAL DA PESQUISA

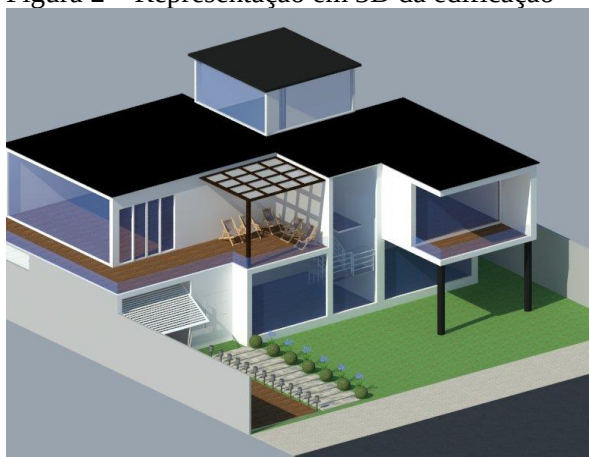
Trata-se da realização de um estudo comparativo e quantitativo, no qual fora levantada a quantidade de aço e concreto necessários para a construção de alguns elementos construtivos de uma edificação residencial.

Neste tipo de estudo, Diana (2019) comenta que o objetivo é compreender os fenômenos através da coleta de dados numéricos, apontando preferências, comportamentos e outras ações do indivíduo que pertencem a determinado grupo ou sociedade. Foram utilizados valores estatísticos, como percentagens, coeficiente de correlação entre outros, cujo objetivo final foi comparar os dois métodos construtivos, levantando números de medidas comumente utilizados na construção civil, como: m³ (metro cúbico) de concreto e Kg (quilos) de aço.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

O estudo foi feito em um projeto já existente de uma edificação residencial de alto padrão, como pode ser observado no projeto, nos Anexos A, B, C e D, e na representação da Figura 2.

Figura 2 – Representação em 3D da edificação



Fonte: AUTOR (2019).

A edificação projetada é composta por dois pavimentos, possui dois quartos com sacada, sala, cozinha, banheiro, garagem e piscina, com uma área total de aproximadamente 370 m², localizada no perímetro urbano da cidade de Cascavel – PR.

Ao longo do desenvolvimento da pesquisa, observou-se que alguns elementos estruturais apresentavam características que indicavam a possibilidade do uso da protensão. Dessa forma, os dados comparados estão relacionados àqueles em que o autor considerou a utilização da técnica da protensão. Os dimensionamentos foram elaborados conforme a NBR 6118/2014 (Projeto de estruturas de concreto – Procedimento), considerando o método de pós-tensão sem aderência ao concreto, utilizando cordoalhas mono-engraxadas.

3.3 INSTRUMENTOS E PROCEDIMENTOS PARA A COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi realizada por meio dos dimensionamentos realizados nos projetos estruturais, que seguiram as recomendações normais da NBR 6118/2014. Utilizou-se o *software* AutoCAD, para auxiliar nos detalhamentos e na compreensão do projeto como um todo.

Em relação ao armazenamento de dados e dimensionamento das estruturas, para o concreto armado convencional, foram utilizadas planilhas do *software* Excel, observando o tamanho dos elementos estruturais, área de aço, armaduras passivas longitudinais e transversais. Ao mesmo passo, para o dimensionamento das estruturas protendidas, utilizou-se o *software* TQS, que por sua vez é um sistema computacional gráfico destinado à elaboração de projetos de estrutura de concreto armado, protendido e em alvenaria estrutural, abordando o lançamento das regiões de protensão uniforme e das regiões de transferências de esforços na estrutura, e estudando as possibilidades de diferentes dimensões dos elementos estruturais da edificação, assim como a verificação do deslocamento máximo das lajes protendidas e da quantidade de cordoalhas nos elementos.

3.4 ANÁLISE DOS DADOS

Após a coleta de dados, realizou-se a análise e a comparação da quantidade de aço e concreto para a construção da residência, relacionando ambos os métodos utilizados e, com base em

bibliografias, apontou-se vantagens e desvantagens dos métodos relacionados para a execução da edificação.

Os dados foram armazenados em planilhas do *software* Excel, conforme modelo do Quadro 1, e apresentados em gráficos, assim como apresentações de figuras demonstrativas e didáticas para ambos os métodos construtivos.

Quadro 1 - Modelo para comparação de quantitativo de aço e concreto

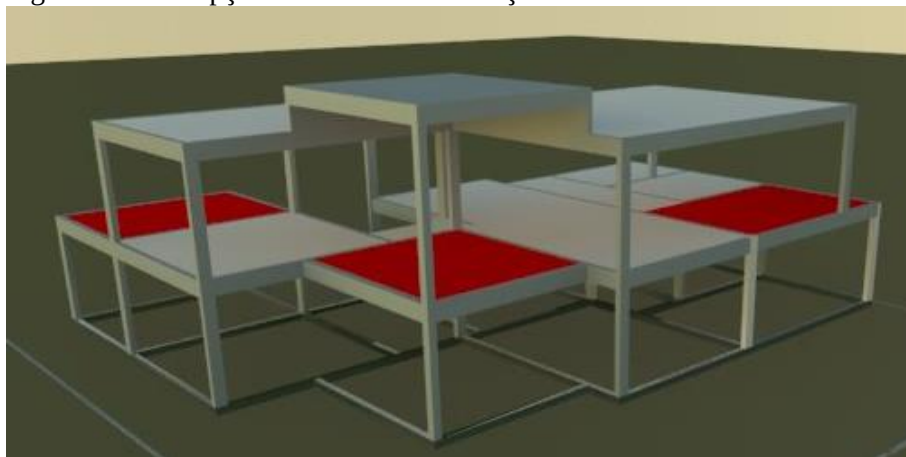
COMPARAÇÃO ELEMENTOS DE CONCRETO CONVENCIONAL E PROTENDIDO									
MODELO CONVENCIONAL					MODELO PROTENDIDO				
			QUANTITATIVO					QUANTITATIVO	
ELEMENTO	DIM(m)	ESP(cm)	AÇO (kg)	CONCRETO (m³)	ELEMENTO	DIM(m)	ESP(cm)	AÇO (kg)	CONCRETO (m³)
TOTAL					TOTAL				

Fonte: AUTOR (2019).

4. ANÁLISES E DISCUSSÕES

Por se tratar da mesma edificação, a concepção estrutural para ambos os métodos foi a mesma, esta que pode ser visualizada na Figura 3. Para Muzardo (2003), essa etapa é uma das mais importantes em um projeto estrutural, pois implica em escolher os elementos a serem utilizados e definir suas posições, de modo a formar um sistema estrutural eficiente, capaz de absorver os esforços oriundos das ações atuantes e transmiti-los ao solo de fundação.

Figura 3 – Concepção estrutural da edificação



Fonte: AUTOR (2019).

Os elementos destacados em vermelho são as lajes, nomeadas, da esquerda para a direita, de Laje 09, Laje 05 e Laje 01, que no presente trabalho serão os objetos de comparação do quantitativo de aço e concreto. Estas lajes foram escolhidas para o dimensionamento, pois possuem a possibilidade da extinção das vigas laterais quando se trata da protensão, tornando-as lajes lisas. De acordo com Ferreira (2006), as lajes lisas podem ser consideradas como uma boa opção para edifícios de concreto, uma vez que, permitem maior agilidade ao processo construtivo devido à simplificação das formas e armaduras do pavimento, reduzindo custos com mão-de-obra, e, principalmente, por atribuírem maior flexibilidade ao layout dos pavimentos.

As lajes são elementos estruturais planos de concreto armado sujeitos a cargas transversais a seu plano. Os apoios das lajes são, geralmente, constituídos por vigas e vigas de piso. Nestes casos, o cálculo das lajes é feito, de maneira simplificada, como se elas fossem isoladas das vigas, com apoios livres à rotação e indeslocáveis à translação, considerando, contudo, a continuidade entre lajes contíguas (MARINS e TAKAHASHI, 2000).

4.1 CRITÉRIOS DE PROJETO

Para efetuar o dimensionamento de estruturas, adotaram-se alguns critérios que são de grande importância para os resultados: a resistência do concreto, a classe de agressividade e os cobrimentos.

4.1.1 Resistência do concreto

Pelo fato de que seriam dimensionados e comparados dois modelos estruturais diferentes, procurou-se adotar a mesma resistência de 30Mpa. Este valor é correspondente ao valor mínimo estipulado pela norma NBR 6118/2014 para elementos protendidos.

4.1.2 Classe de agressividade

De acordo com a NBR 6118/2014, o ambiente de inserção da edificação pode ser considerado de classe de agressividade II, pois considerou-se a inserção na área urbana da cidade de Cascavel – PR.

4.1.3 Cobrimentos

Como cobertura mínimo, considerou-se as definições da NBR 6118/2014, que indica um cobrimento de 2,5cm para lajes em concreto armado convencional e para lajes em concreto protendido de 4cm.

4.2 DESENVOLVIMENTO DOS DIMENSIONAMENTOS

4.2.1 Estrutura de concreto armado convencional

4.2.1.1 Esforços solicitantes

Os esforços solicitantes em uma laje maciça podem ser divididos em duas categorias:

- a) Cargas permanentes, que são cargas que ficarão durante toda a vida útil da estrutura, como o peso próprio e o peso de paredes (quando houver). Para o dimensionamento, seguiu-se a NBR 6120/1980, a qual considera um peso específico do concreto de 25kN/m^3 e 19kN/m^3 para o revestimento argamassado. Por se tratar de uma edificação de alto padrão, consideraram-se piso porcelanato, com um peso de $0,2\text{ kN/m}^2$ e forro de gesso em placas de $60\times 60\text{cm}$, com peso de $0,18\text{kN/m}^2$.
- b) Cargas variáveis, que são cargas que ficam de forma provisória na estrutura, como móveis e pessoas. De acordo com a NBR 6120/1980, considerou-se um carregamento variável de 1.5kN/m^2

para dormitórios, sala, copa, cozinha e banheiro e 2kN/m² para despensa, área de serviço e lavanderia.

4.2.1.2 Espessura

Nos casos de lajes maciças, a NBR 6118/2014 não apresenta recomendações em relação à espessura. Porém, existe uma recomendação utilizada na versão anterior da norma, a NBR 6118/1980, na qual as espessuras de lajes maciças podem ser encontradas através da Equação 1.

$$e = l_x / (\gamma_3 \cdot \gamma_2) \quad (1)$$

Onde:

l_x = O menor vão da laje;

γ_3 e γ_2 = Coeficientes que levam em consideração o concreto utilizado na estrutura e os apoios da laje. No dimensionamento foram utilizados os valores de 25 para γ_3 e para o γ_2 de 1,6096, 1,7644 e 1,8578 para as lajes 01, 05 e 09, respectivamente.

Como resultados, encontrou-se o que está apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 – Espessuras das lajes

Espessuras - Modelo em concreto armado convencional			
Laje	L_y - Maior vão (cm)	L_x - Menor vão (cm)	Espessura (cm)
1	598	405	10
5	490	450	11,1
9	495	400	8,6

Fonte: AUTOR (2019).

A NBR 6118/2014 apresenta uma série de valores mínimos para as lajes maciças, que deve ser utilizada de acordo com o tipo de utilização que a laje terá, a qual obedece aos valores de 8cm para lajes de piso não em balanço.

4.2.1.3 Lajes com armaduras em duas direções

Os vãos das lajes é um quesito de suma importância no desenvolvimento de uma estrutura, pois são eles que determinarão se a laje será armada em 1 ou 2 direções. Para encontrar esses valores, encontra-se o valor de λ dividindo-se o maior vão (l_y) pelo menor vão (l_x). Com o valor de λ , define-se se a laje será armada em 1 ou 2 direções da seguinte maneira:

- Se $\lambda \geq 2$, laje armada em duas direções.
- Se $\lambda < 2$, laje armada em uma direção.

Os resultados de λ para as lajes em estudo estão representados no Quadro 3.

Quadro 3 – Determinação das direções das armaduras

λ e determinação das direções das armaduras			
Laje	λ	$\lambda < 2$	Direções
1	1,4765	Não	2 direções
5	1,0888	Não	2 direções
9	1,2375	Não	2 direções

Fonte: AUTOR (2019).

4.2.1.4 Momentos fletores

As lajes são solicitadas, essencialmente, por momentos fletores e forças cortantes. O cálculo das lajes pode ser feito por dois métodos: o elástico (adotado para essa pesquisa) e o plástico.

No método elástico, são encontrados os coeficientes μ_x , μ'_x , μ_y , μ'_y , que são adimensionais e podem ser encontrados através de algumas tabelas que são conhecidas como tabelas de Marcus, nas quais, através dos vãos e das condições de apoio das lajes, é possível encontrar os coeficientes. Com esses coeficientes, pode-se determinar os momentos atuantes nas lajes, por meio das equações apresentadas na Figura 4.

Figura 4 - Determinação dos momentos fletores atuantes nas lajes

$$m_x = \mu_x \cdot \frac{p \cdot \ell_x^2}{100} \quad m'_x = \mu'_x \cdot \frac{p \cdot \ell_x^2}{100}$$

$$m_y = \mu_y \cdot \frac{p \cdot \ell_y^2}{100} \quad m'_y = \mu'_y \cdot \frac{p \cdot \ell_y^2}{100}$$

$m_x, m'_x \rightarrow$ momentos fletores na direção do vão ℓ_x

$m_y, m'_y \rightarrow$ momentos fletores na direção do vão ℓ_y

Fonte: MUZARDO (2010).

Após os cálculos, os resultados encontrados estão representados no Quadro 4.

Quadro 4 – Coeficientes e momentos positivos e negativos atuantes nas lajes

Coeficientes e momentos atuantes nas lajes								
	μ_x	μ'_x	μ_y	μ'_y	η_x (kN.m/m)	η'_x (kN.m/m)	η_y (kN.m/m)	η'_y (kN.m/m)
Laje 01	4,66	10,29	2,28	8,03	5,44	12,03	2,67	9,39
Laje 05	3,14	7,77	2,67	7,32	3,85	9,55	3,28	9,00
Laje 09	4,51	9,99	2,53	-	3,92	8,70	2,20	-

Fonte: AUTOR (2019).

O momento negativo na direção “y” da Laje 09 não existirá devido ao tipo de apoio da laje, por não estar engastada em nenhuma outra laje nessa direção.

4.2.1.5 Compatilização dos momentos fletores

Os momentos fletores nos vãos e nos apoios também são conhecidos como momentos positivos e negativos, respectivamente. No cálculo desses momentos fletores, consideram-se os apoios internos de lajes contínuas como perfeitamente engastados, quando na realidade isso não vai ocorrer.

Sendo assim, a necessidade de se compatibilizar os momentos vem de que, em um pavimento, em geral, as lajes adjacentes diferem-se nas condições de apoio, nos vãos teóricos ou nos carregamentos, resultando, no apoio comum, dois valores diferentes para o momento negativo. Para se realizar a compatibilização, foram utilizadas as equações dispostas no Anexo E.

No Quadro 5 estão representados os valores encontrados para os momentos fletores compatibilizados.

Quadro 5 - Determinação dos momentos compatibilizados nas lajes

Momentos atuantes compatibilizados				
	mdx (kN.cm)	md'x (kN.cm)	mdy (kN.cm)	md'y (kN.cm)
Laje 01	762,20	1684,56	373,67	1314,16
Laje 05	539,42	1337,48	459,79	1259,57
Laje 09	549,49	1218,59	308,63	0,00

Fonte: AUTOR (2019).

Os momentos atuantes acima apresentam um coeficiente de majoração determinado pela NBR 6118/2014 de 1,4, deixando os momentos já majorados para serem utilizados no dimensionamento das armaduras positivas e negativas das lajes.

4.2.1.6 Dimensionamento das armaduras

Com os momentos atuantes conhecidos, passa-se ao dimensionamento das armaduras das lajes. A área de aço necessária foi calculada considerando uma largura de 100cm. Portanto, os resultados obtidos se referem a uma taxa de armadura por metro linear. Após a determinação do dimensionamento, comparou-se os valores com os valores mínimos definidos pela NBR 6118/2014, correspondentes ao que pode ser encontrado através da Equação 2.

$$\rho_s \geq \rho_{\min} - 0,5\rho_p \geq 0,5 \rho_{\min} \quad (2)$$

Onde:

$\rho_s = A_s/bw \cdot h$ e $\rho_p = A_p/bw \cdot h$; $\rho_{\min} = 0,15\%$ determinado pela NBR 6118/2014 para concretos de $F_{ck} 30\text{MPa}$.

Após a determinação da área de aço, adotou-se o diâmetro da barra de aço a ser utilizada, assim como a quantidade de barras e a verificação dos deslocamentos verticais das lajes, sendo que os resultados podem ser observados no Quadro 6.

Quadro 6 - Determinação das armaduras e verificação dos deslocamentos

Determinação das armaduras e verificação dos deslocamentos										
		As (cm²)	As,min (cm²)	Situação	φ da barra (mm)	numº de barras	Espaçamento (cm)	Desl.(cm)**	Desl máx (cm) ***	Situação
Laje 01	kcx	2,59	1,5	OK	6,3	9	12	0,8	1,62	OK
	kc'x	6,20	1,5	OK	10	8	12,5			
	kcy	1,22	1,5	Ñ OK*	6,3	5	20			
	kc'y	4,65	1,5	OK	8	10	10			
Laje 05	kcx	1,60	1,65	Ñ OK*	6,3	6	12	0,7	1,8	OK
	kc'x	4,12	1,65	OK	8	9	12			
	kcy	1,30	1,65	Ñ OK*	6,3	6	12			
	kc'y	3,73	1,65	OK	8	9	13			
Laje 09	kcx	2,35	1,5	OK	6,3	8	13	0,7	1,6	OK
	kc'x	5,86	1,5	OK	10	8	13			
	kcy	1,32	1,5	Ñ OK	6,3	5	20			
*Em casos de As,min > As, utilizou-se o As,min.										
** Deslocamentos das lajes encontrados com o auxílio do <i>software</i> TQS.										
*** Deslocamento máximo utilizado conforme NBR 6118/2014 - lx/250.										

Fonte: AUTOR (2019).

4.2.1.7 Quantitativo de aço e concreto para o modelo de concreto armado convencional

Após o término do dimensionamento, pode-se então realizar o levantamento do quantitativo de materiais (aço e concreto) para os elementos considerados. Os dados podem ser observados no Quadro 7.

Quadro 7 – Quantitativo do modelo em concreto armado convencional

QUANTITATIVO DE MATERIAIS				
MODELO CONVENCIONAL				
			QUANTITATIVO	
ELEMENTO	DIMENSÕES(m)	ESP(cm)	AÇO (kg)	CONCRETO (m ³)
LAJE 01	5,98x4,05	10	160,96	2,56
LAJE 05	4,5x4,9	11	149,63	2,583
LAJE 09	4,95x4,00	9	120,09	1,904
TOTAL			430,68	7,047

Fonte: AUTOR (2019).

4.2.2 Estrutura de concreto protendido

4.2.2.1 Critérios de projeto

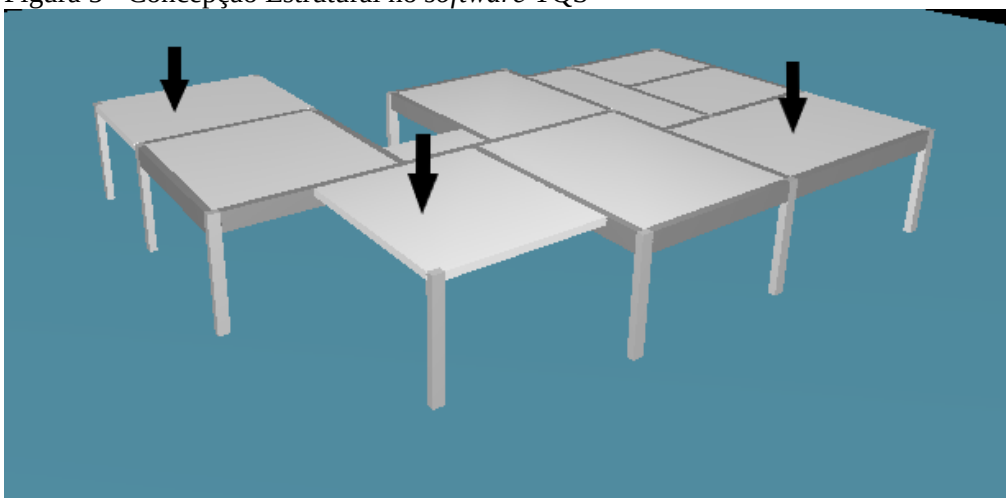
Por se tratar de um *software* próprio para o dimensionamento de estruturas, alguns critérios iniciais foram utilizados para um melhor resultado. Estes critérios podem ser observados no Anexo F.

O *software* TQS tem como parâmetro de dimensionamento a norma vigente de dimensionamento de estrutura de concreto NBR 6118/2014. Os carregamentos utilizados nas lajes para o dimensionamento do modelo em concreto protendido foram os mesmos utilizados no modelo de concreto armado convencional.

4.2.2.2 Posicionamento dos elementos estruturais

Após as configurações dos critérios de projeto, os elementos estruturais foram posicionados, tendo como base o projeto arquitetônico. A representação do lançamento da estrutura pode ser observada na Figura 5. Posiciona-se os elementos estruturais, como pilares, vigas e lajes.

Figura 5 - Concepção Estrutural no *software* TQS



Fonte: AUTOR (2019).

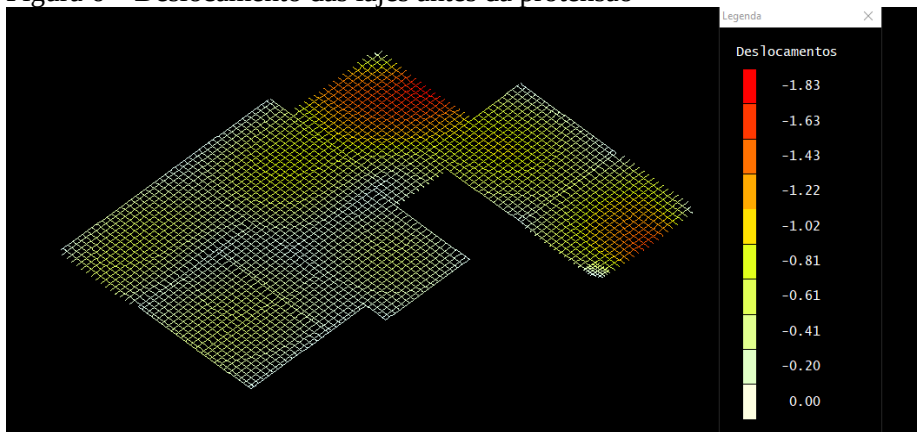
Um detalhe a ser observado é que as Lajes 09 e 05 foram dimensionadas como lajes lisas, ou seja, sem o fechamento com vigas laterais. Souza (2018) comenta que as lajes lisas, apesar de não

serem adotadas com tanta frequência, se comparada a outros sistemas, permite vencer grandes vãos. A ausência de vigas, que gera descontinuidade na execução das fôrmas e armações, permite fácil execução, principalmente se comparada a outros tipos de laje moldadas *in loco*, como a nervurada, por exemplo.

4.2.2.3 Verificação dos deslocamentos da laje

Feito o lançamento de todos os elementos estruturais, suas devidas dimensões e carregamentos, há a necessidade de atentar-se aos deslocamentos das peças da estrutura, conforme Figura 6.

Figura 6 – Deslocamento das lajes antes da protensão



Fonte: AUTOR (2019).

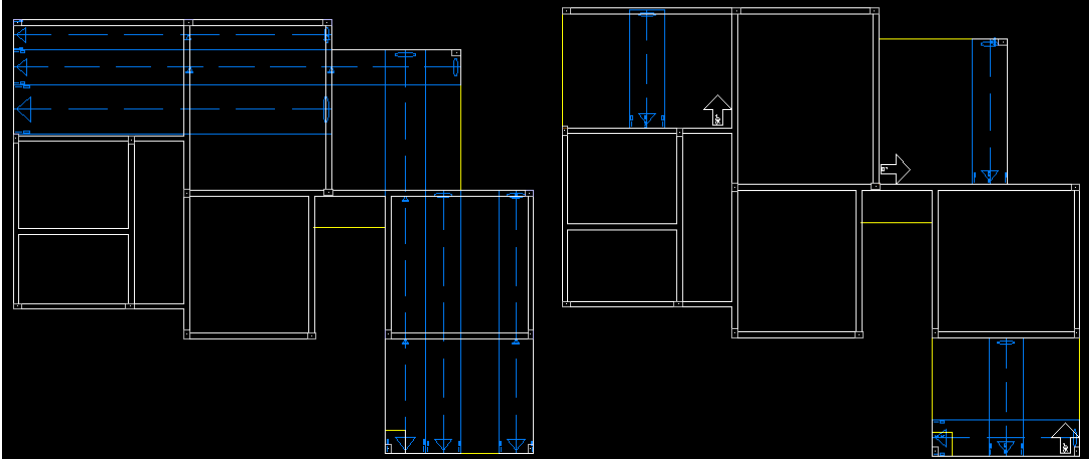
Como pode se observar, as lajes 05 e 09 possuem deslocamentos excessivos fora da norma, de 1,83cm e 1,63cm, respectivamente. Portanto, o posicionamento das regiões de protensão uniforme terão uma ênfase nesses respectivos locais.

4.2.2.4 Posicionamento das RPU e RTEs

O posicionamento das RPUs (regiões de protensão uniforme) e RTEs (regiões de transferência de esforços) deve ser feito buscando as áreas com os maiores deslocamentos da laje, visando melhor aproveitando da protensão. Portanto, as RPUs foram posicionadas conforme pode

se observar na Figura 7. Salienta-se que as RTEs são posicionadas em todo o perímetro das lajes, para solicitar ao *software* que calcule as RPU's para toda a região englobada pela RTE.

Figura 7 – a) Posicionamento de RPU's na direção principal; b) Posicionamento de RPU's na direção secundária



Fonte: AUTOR (2019).

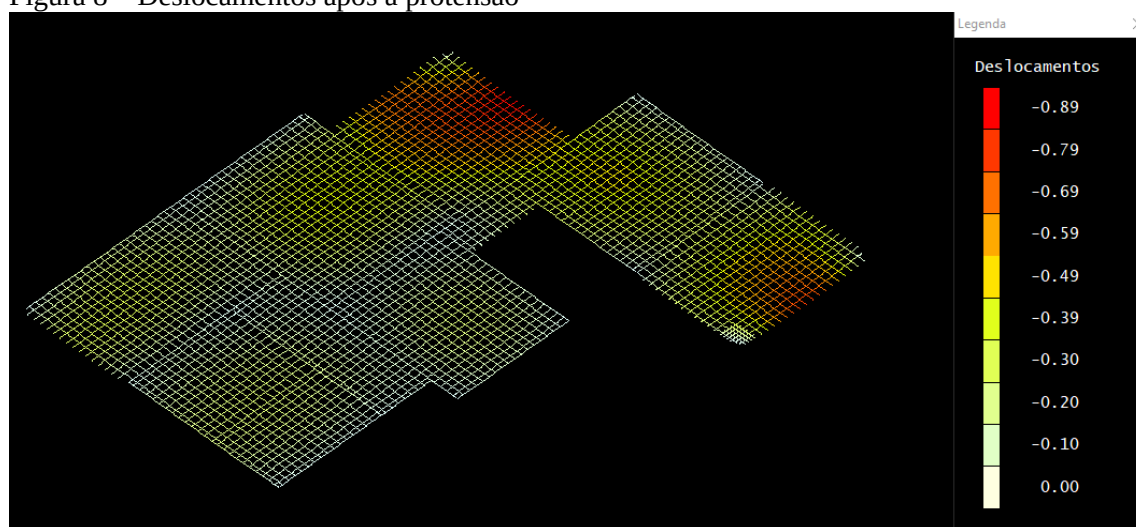
4.2.2.5 Verificação das tensões, fissuração e quantidade de cabos e cordoalhas

Posicionadas as RPU's, é possível verificar o posicionamento do cabo de protensão na parte interna da laje, ou seja, consegue-se observar como estão as tensões do elemento estrutural, assim como a trajetória do cabo, a quantidade de cabos e cordoalhas que foram posicionadas e a fissuração da laje, características que podem ser observadas através das Anexos G e H. Este último, que trata da fissuração da laje, confirma a afirmação de Castro (2011), que comenta que uma das vantagens do uso da protensão é a redução da incidência de fissuras muito comuns em lajes submetidas sobrecargas.

4.2.2.6 Verificação do deslocamento com elementos protendidos

Após a protensão dos elementos, necessita-se refazer a análise dos deslocamentos para verificar se estão atendendo aos limites citados na NBR 6118/2014. Os deslocamentos com as lajes já protendidas podem ser analisadas na Figura 8.

Figura 8 – Deslocamentos após a protensão



Fonte: AUTOR (2019).

Observa-se, então, uma clara melhora no deslocamentos das lajes após as mesmas serem protendidas.

4.2.2.7 Quantitativo de aço e concreto para o modelo de concreto protendido

Em seguida ao dimensionamento da protensão e da realização de todas as verificações, pôde-se então determinar o quantitativo de aço e concreto para o modelo estrutural em concreto protendido. Este quantitativo pode ser visualizado através do Quadro 8.

Quadro 8 – Quantitativo de aço e concreto para o modelo em concreto protendido

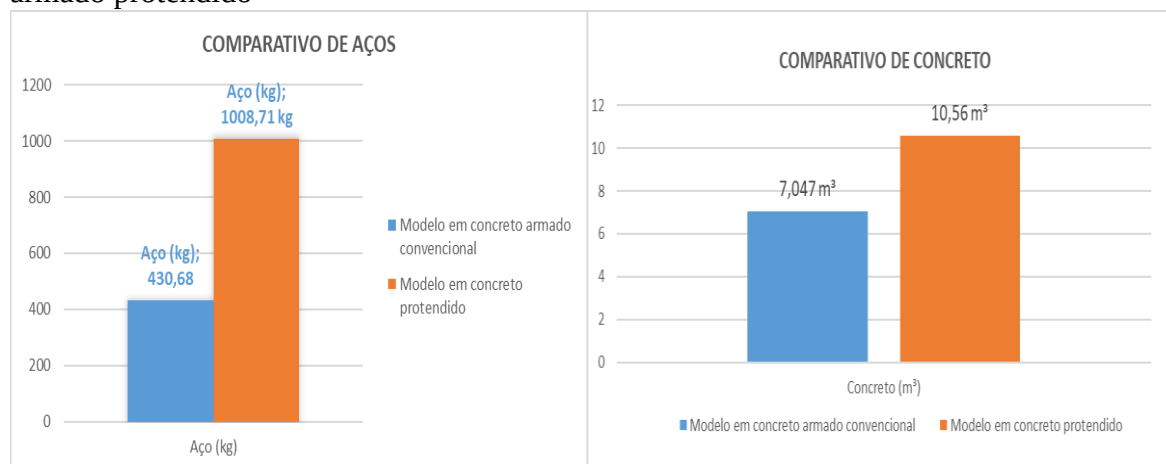
QUANTITATIVO DE MATERIAIS					
MODELO PROTENDIDO					
			QUANTITATIVO		
ELEMENTO	DIMENSÕES(m)	ESP(cm)	AÇO ARMADURA PASSIVA(kg)	AÇO ARMADURA ATIVA(kg)	CONCRETO (m³)
LAJE 01	5,98x4,05	16	106,64	431	3,86
LAJE 05	4,5x4,9	16	241,43		3,53
LAJE 09	4,95x4,00	16	229,64		3,17
TOTAL			577,71	431	10,56
TOTAL			1008,71 Kg		

Fonte: AUTOR (2019).

4.3 Comparativo entre os dimensionamentos e os sistemas

Após a elaboração dos quantitativos de ambos os métodos construtivos propostos neste estudo, o comparativo de aço e concreto pode ser observado no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Comparativo de aço e concreto – Modelos em concreto armado convencional e concreto armado protendido



Fonte: AUTOR (2019).

No quesito aço, houve um acréscimo de 134% no concreto protendido em relação ao concreto armado convencional. Essa diferença está na designação dos apoios das lajes, tendo em vista que o modelo em concreto armado fora dimensionado com lajes biapoiadas. Em contrapartida, no modelo em concreto protendido, foram retiradas as vigas externas, fazendo com que houvesse aumento no momento fletor da laje.

Em relação ao concreto, observa-se um aumento de aproximadamente 46% no concreto protendido em relação ao concreto convencional. Este acréscimo pode ser justificado quando se verifica os apoios das lajes. O fato de se ter usado lajes lisas no dimensionamento acarretou com que o mínimo da espessura recomendado pela NBR 6118/2014 tivesse um salto de 8cm para 16cm. Portanto, o acréscimo de concreto das lajes em concreto protendido deve-se a sua maior altura. Em contrapartida, com a ausência das vigas externas, pode-se ter uma economia em concreto e em fôrmas.

O método de protensão é um grande exemplo de um novo mercado que vem em ascendência, pois é um método que, assim como vários outros métodos alternativos, apresenta uma série de vantagens em relação ao concreto armado convencional, como pode ser observado pela comparação do Quadro 9.

Quadro 9 – Apresentação de vantagens e desvantagens do concreto protendido

Vantagens e Desvantagens - Concreto Protendido	
Vantagens	Desvantagens
Redução das tensões de tração provocadas pela flexão e pelos esforços cortantes aplicadas nas lajes CASTRO (2011).	Condutibilidade alta de calor e de som CHUST (2017).
Extingue as forças de tração nas lajes, sendo possível obter menores deformações elásticas e melhores condições de durabilidade (SILVA, 2015).	Dificuldade na disponibilidade tecnológica (conhecimentos, recursos humanos e materiais) para se projetar e executar obras com a protensão (HANAL, 2005).
Permite eliminar a fissuração no estado de serviço (ELS) da peça (MELLO, 2005).	Exige atenção especial ao posicionamento dos cabos, já que desvios inadequados podem causar esforços não previstos (FARIA, 2004).
Permite que a estrutura se recomponha após a atuação de uma sobrecarga eventual não prevista. Cessada a causa, as fissuras abertas se fecham devido à força de protensão (VERÍSSIMO e CÉSAR JR, 1998).	As operações de protensão exigem equipamento e pessoal especializados para controle dos esforços aplicados e alongamento dos cabos (FARIA, 2004).
Permite vãos maiores devido ao menor número de pilares necessários (CAUDURO, 2003).	Maior tendência a corrosão dos aços de protensão (SILVA, 2015).

Fonte: AUTOR (2019).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As estruturas de concreto em lajes apoiadas sobre vigas é o método mais utilizado e conhecido no Brasil, pois representam a maioria das edificações presentes no país. Isso se deve ao fato de que é o método mais conhecido do público atuante no mercado da construção civil, inclusive da mão de obra. Porém, métodos alternativos vêm surgindo com cada vez mais força neste mercado, não só no Brasil, mas em todo o mundo.

De acordo com os resultados obtidos, conclui-se que o concreto protendido apresenta uma série de vantagens em relação ao concreto armado convencional. Contudo, o consumo de material necessário é de extrema importância em uma obra, pelo fato de que o aço no modelo em concreto protendido atingiu mais do que o dobro em relação ao modelo em concreto armado convencional. Os custos provenientes seriam superiores para tornar a construção em concreto protendido viável. Em contrapartida, a eliminação das vigas reduz os custos com fôrmas, por exemplo, além de influenciarem diretamente no cronograma executivo da obra, uma vez que estruturas protendidas podem ser construídas mais rapidamente, impactando assim no prazo de conclusão da obra e, por consequência, nos custos globais do empreendimento. Esses são fatores que também podem ser analisados na determinação do método executivo a ser empregado em uma construção.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRO DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 – Projetos de estrutura de concreto – procedimento**. Rio de Janeiro. 2014.

_____. **NBR 6120 - Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro. 1980.

BASTOS, P.S.S. Estruturas de concreto armado. **UNESP – Universidade Estadual Paulista**. São Paulo: 2014.

CAMACHO, J. S. Introdução ao estudo do concreto armado. **UNESP – Universidade Estadual Paulista**. São Paulo: 2008.

CAPRANI, C. **Civil engineering design – Prestressed concrete**. [S.l]: 2007.

CARVALHO, M. P. Concreto armado e protendido têm diferentes propriedades e aplicações. **AECweb**, 2016. Disponível em < https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/concreto-armado-e-protendido-tem-diferentes-propriedades-e-aplicacoes_12306_10_0 > acesso em 20.abril.2019.

CASTRO.S.V. **Concreto Protendido – Vantagens e desvantagens dos diferentes processos de protensão do concreto nas estruturas**. UFMG. Universidade Federal de Minas Gerais. Monografia de Especialização. Minas Gerais.MG.2011.

CAUDURO, E.L. **Manual para a boa execução de estruturas protendidas usando cordoalhas de aço engraxadas e plastificadas**. 2 ed.[S.l]. 2003.

CHUST, R.C. **Estruturas em concreto protendido: cálculo e detalhamento**. v.1. Pini: 2017.

DIANA, J. **Qual a diferença entre pesquisa quantitativa e pesquisa qualitativa?**. 2019. Disponível em < <https://www.diferenca.com/pesquisa-quantitativa-e-pesquisa-qualitativa/> > acesso em 19/05/2019.

DURANTI, G. Sistema de protensão não aderente (pós-tensionamento). **UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul**. [S.l]. 2014. Disponível em < <https://www.ufrgs.br/eso/content/?p=1701> > acesso em: 12.abril.2019.

FARIA. E.L, **Projeto de lajes planas protendidas via método dos elementos finitos e pórticos equivalentes**. UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado. Programa de pós-graduação em Engenharia Civil. Minas Gerais. 10.maio.2004.

FERREIRA, M.P. **Análise experimental de lajes lisas unidirecionais de concreto armado ao punção simétrico ou assimétrico**. Dissertação de Mestrado. Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém. PA. 2006.

HANAL. J.B., **Fundamentos do concreto protendido**. USP – Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos. 2005.

HURST, M.K. **Prestressed concrete design**. 2 ed. Nova Iorque: 1998.

LEONHARDT, F. **Construções de concreto – concreto protendido**. vol. 5. Editora Interciência. 1983.

LOUREIRO, Giordano José. Projeto de lajes protendidas com cordoalhas engraxadas. In: **Anais do Vi Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto**, 2006. Fortaleza. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2006.

MARCHETTI, O.; BOTELHO, M.H.C. **Concreto armado eu te amo**. v.1, 3ed. Edgard Blucher LTDA. [S.l]. 2002.

MARINS, K.R.C.; TAKAHASHI, R.I. **Refêrencia para Cálculo de Concreto Armado**. USP – Escola Politécnica de Engenharia de Estruturas e Fundações, São Paulo: 2000.

MELLO, A.L.V., **Cálculo de lajes lisas com protensão parcial e limitada**. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2005.

MONTEIRO, T. C. L., **Análise comparativa dos fatores influentes na tensão última de protensão de cabos aderentes e não aderentes**. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul: 2008.

MUZARDO, C.D. **Estruturas de concreto – concepção estrutural**. Cap. 4, USP – ESSC – Departamento de Engenharia de Estruturas, São Paulo: 2003.

RAJU, N. K.. **Prestressed concrete**. 4 ed. Nova Deli, Índia: 2007.

SOUZA, E. **Tipos de lajes de concreto: vantagens e desvantagens**. 2018. Disponível em <<https://www.archdaily.com.br/br/889035/tipos-de-lajes-de-concreto-vantagens-e-desvantagens>>. Acesso em: 10.Outubro.2019.

SILVA, F.N. **Análise comparativa entre lajes em concreto armado e concreto protendido**. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil). Universidade de Pernambuco Recife, 2015.

SOBRAMANIAN, N. **Design of reinforced concrete structures**. Maryland, USA: 2013.

VERÍSSIMO, G.S.; CÉSAR JR.K.M.L. **Concreto protendido – fundamentos básicos**, 4 ed. UFV – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa: 1998.

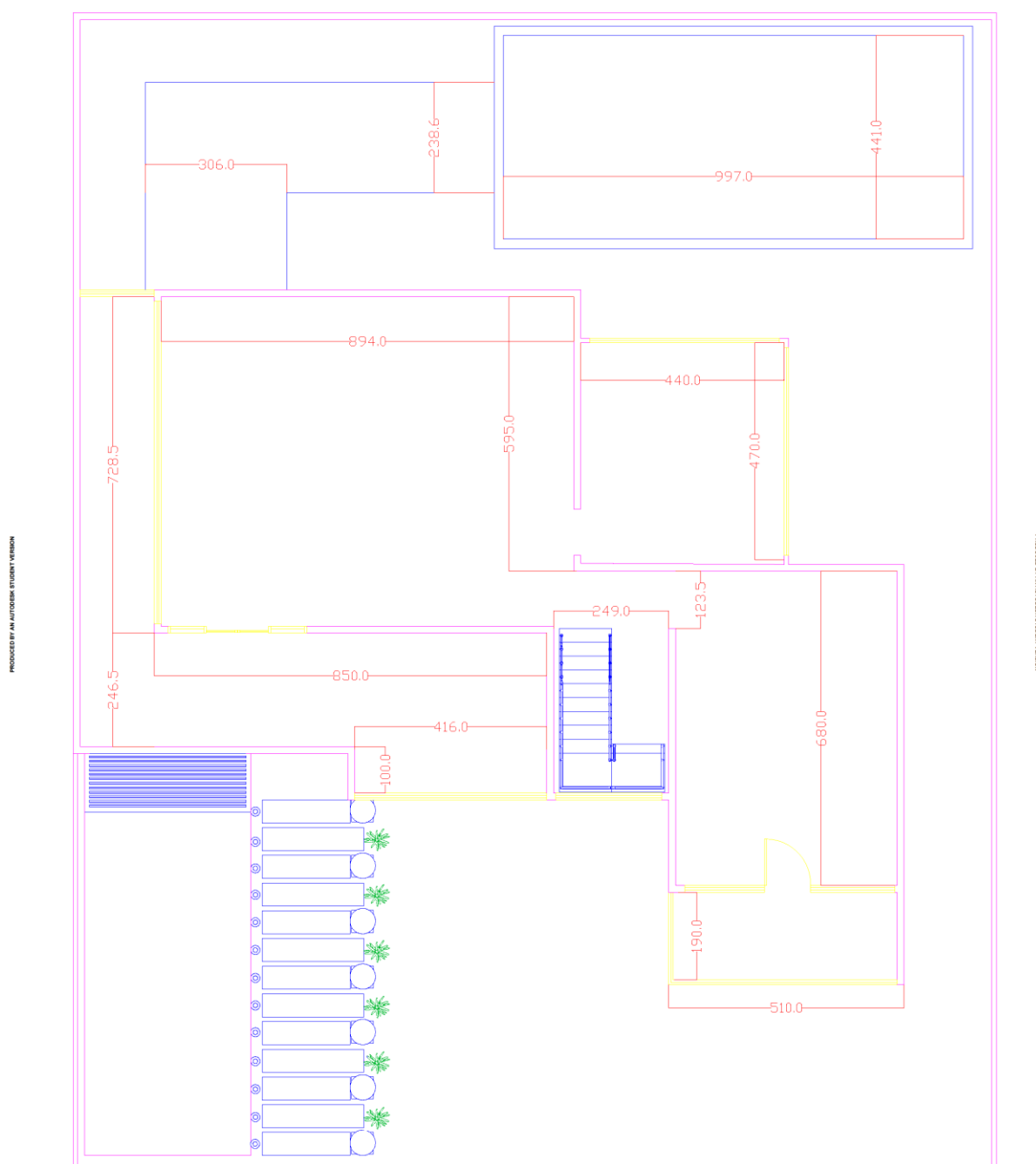
ANEXO A – PERSPECTIVA FRONTAL DA EDIFICAÇÃO



ANEXO B – DETALHE DOS FUNDOS RESIDÊNCIA

ANEXO C – CROQUI DO PAVIMENTO TÉRREO DA EDIFICAÇÃO

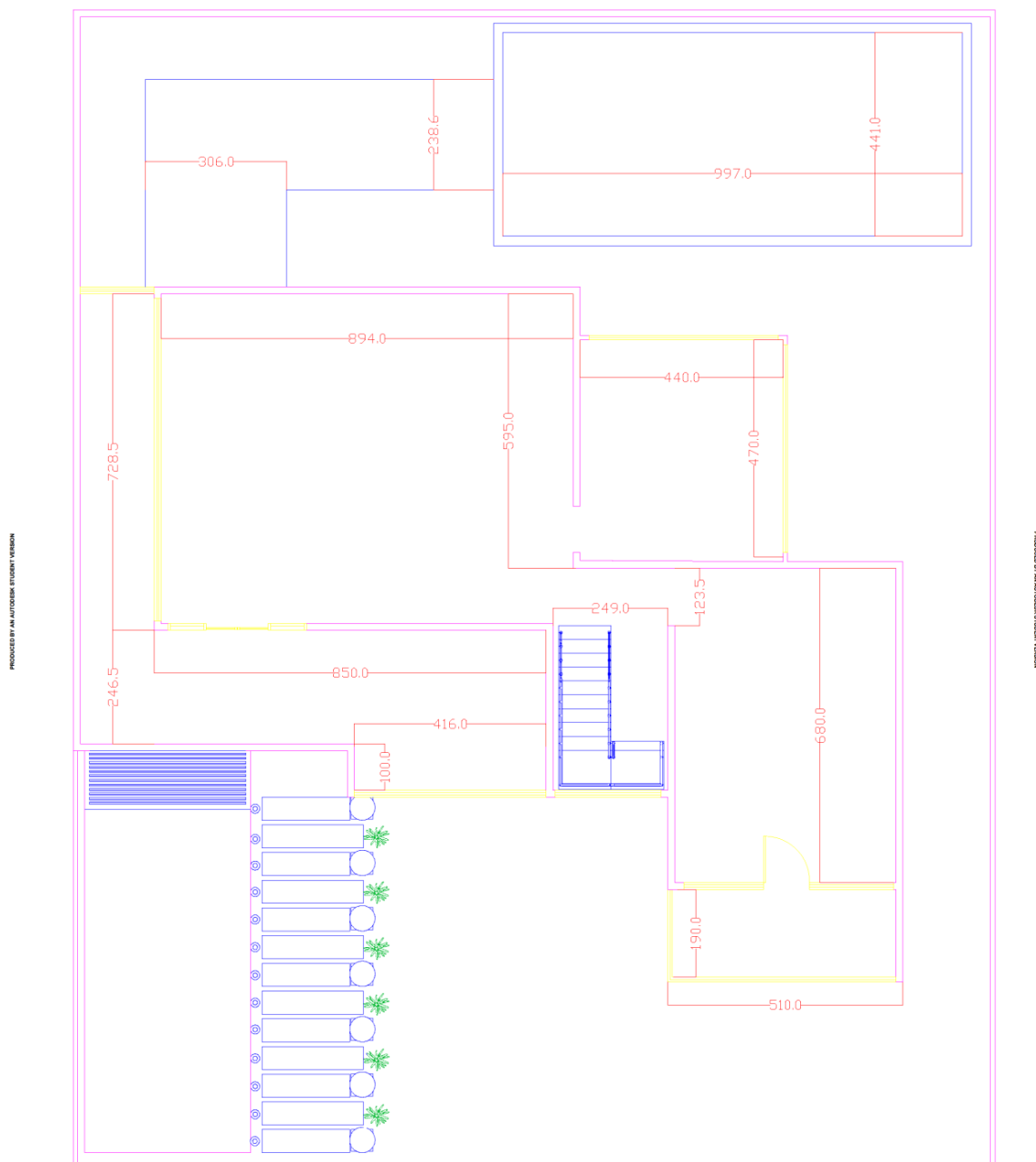
PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION



PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION

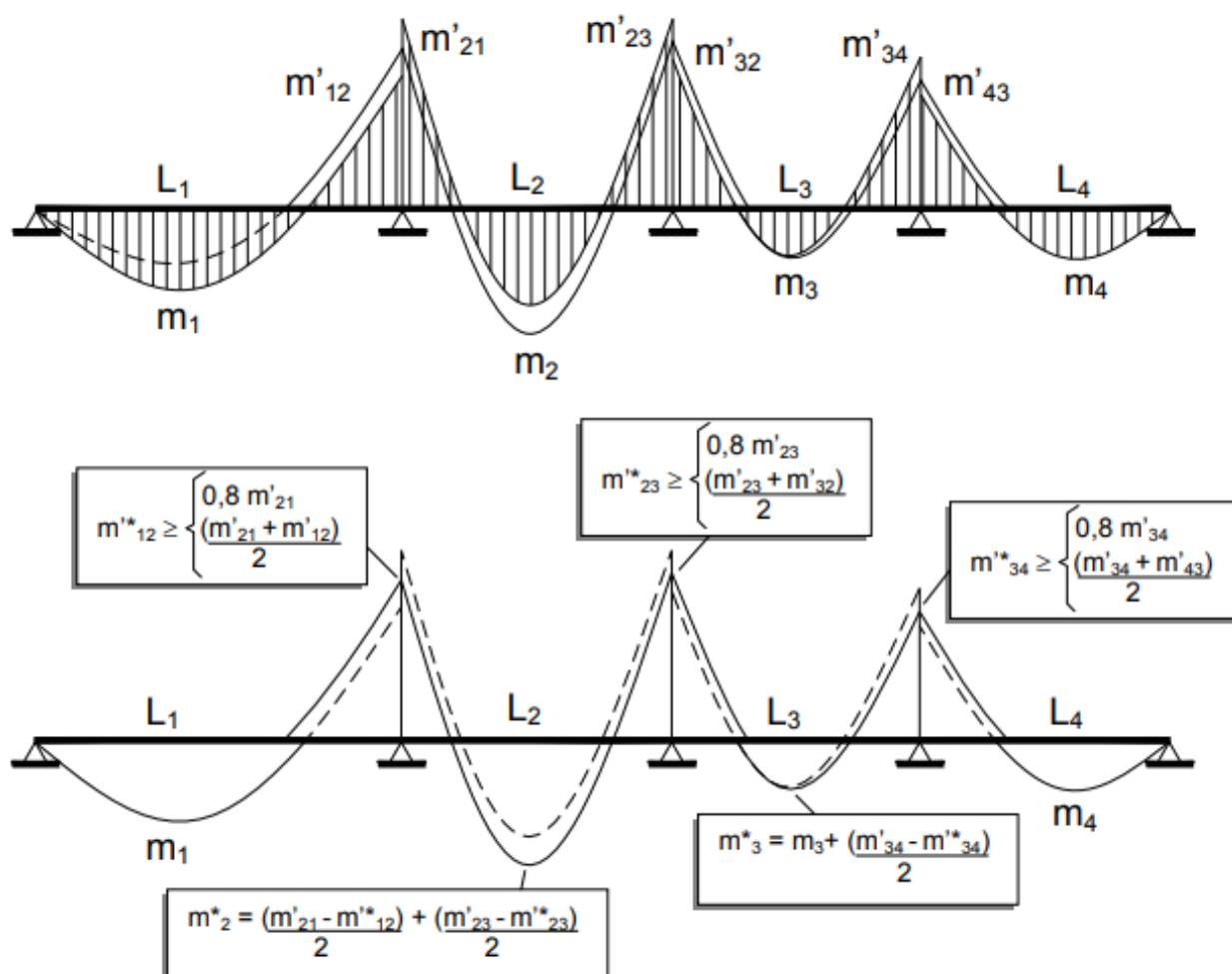
ANEXO D – CROQUI DO PAVIMENTO SUPERIOR DA EDIFICAÇÃO

PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION



PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION

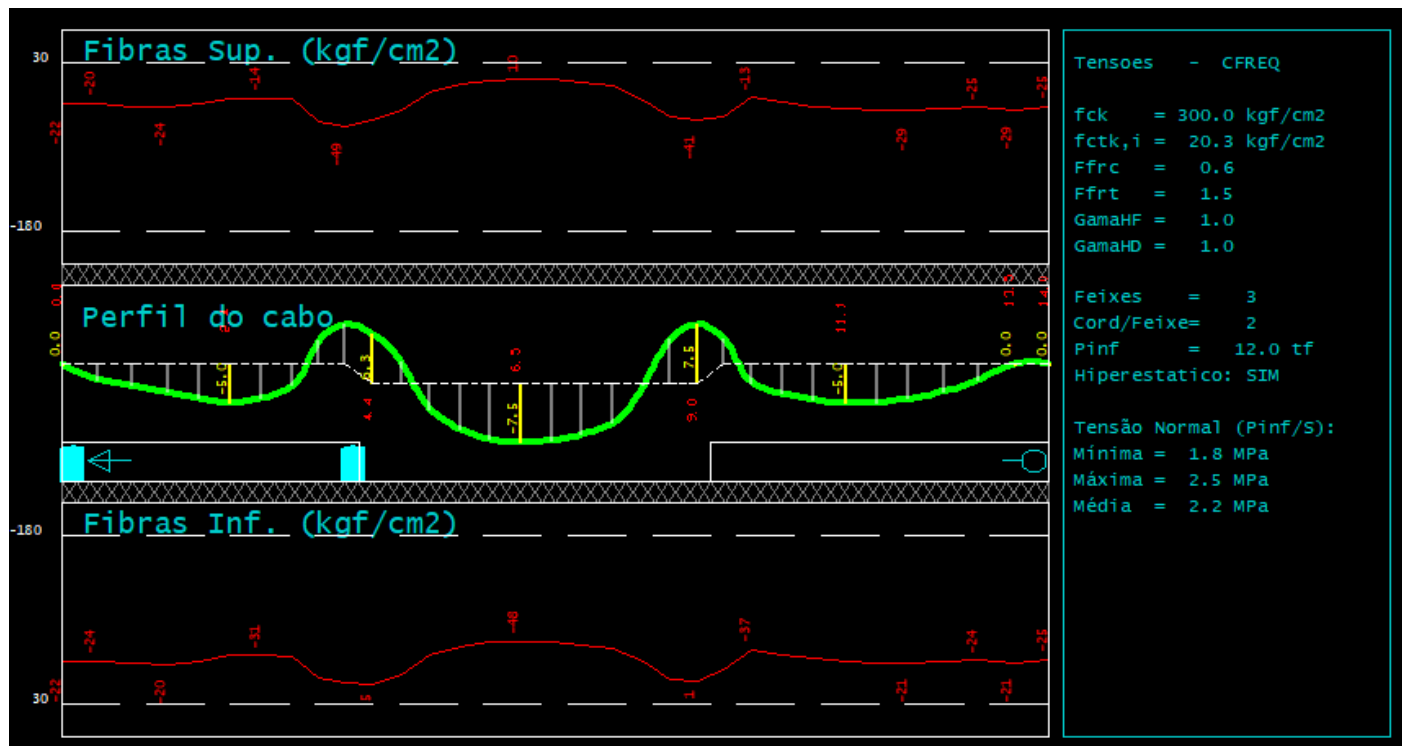
ANEXO E – DETERMINAÇÃO DO MOMENTOS COMPATIBILIZADOS NAS LAJES



ANEXO F – CRITÉRIOS UTILIZADOS NO SOFTWARE TQS PARA ELABORAÇÃO DO MODELO PROTENDIDO

Critério Utilizado	Valor	Unidade	Critério Utilizado	Valor	Unidade
Fck	30	MPa	Tensão máxima de compressão	0,7 * fckj	
Ec	2683841	tf/m ²	Tensão máxima de tração	1,2 * fckj	
fckj	210	kgf/cm ²	Tensão máxima de compressão **	0,6	
Es	2,10E+07	tf/m ²	Tensão máxima de tração **	1,5	
Coef de Atrito*	0,2		Tensão máxima de compressão ***	0,6	
Coef de perda/metro*	0,0035		Tensão máxima de tração ***	1,5	
Espaçamento Máximo	50	cm	Espaçamento máximo entre cabos centrais	6	cm
□c	0		Espaçamento mínimo entre cabos centrais	1,6	cm
□p	1,1		Espaçamento mínimo entre ancoragens	3,5	cm
□f	1		Número padrão de cordoalhas por cabo	1	
□hiper favorável	0,9		Bitola padrão para detalhamento	12,7	
□hiper desfavorável	1		Redutor quantidade inicial de cabos	20	
* Para cordoalhas engraxadas					
** Para combinação quase permanente					
*** Para combinação Frequente					

ANEXO G – DETALHE DO POSICIONAMENTO DO CABO, E NUMERO DE FEIXES E CABOS



ANEXO H – DETALHE DA FISSURAÇÃO DOS ELEMENTOS

